

두롤 교정기의 롤 갭 변화에 따른 봉강의 잔류응력과 소성변형에 관한 연구 §

조현수^{*†}, 함주희^{*}, 이영호^{*}

* 동부제철 기술연구소

A Study of Residual Stress and Plastic Deformation of a Bar with Gap Size Changes Between Rolls in a Two Cross-Roll Straightener

Hyun Soo Cho^{*†}, Ju Hee Hahm^{*} and Young Ho Lee^{*}

* Technical Research Laboratories, Dongbu Steel Co., Ltd.

(Received December 16, 2010; Revised January 26, 2012; Accepted February 7, 2012)

Key Words : Straightener(교정기), Residual Stress(잔류응력), Plastic Deformation(소성변형), X-ray Diffraction(X선 회절)

초록: 마봉강(CD bar)은 표면조도, 치수 정밀도 그리고 진직도 등에서 우수한 특성을 가진다. 그러한 특성들로 인해 자동차 및 가전 제품의 부품으로 산업현장에서 다양하게 사용되고 있다. 산업계에서 다양하게 사용되는 마봉강 제품은 두롤 교정기를 통해 만들어지고 있으며 본 논문에서는 마봉강을 생산하는 핵심공정인 두롤 교정기 연구를 통해 롤 갭에 따른 영향을 살펴 보았다. 두롤 사이의 간격인 롤 갭의 변화는 봉강의 잔류응력과 소성변형에 많은 영향을 주는 것을 실험적으로 확인하였다. 이를 확인하기 위해 2 롤 교정 전 공정인 인발공정에서 다이 통과 후 선경 변화와 봉강 내 잔류응력분포에 대해 유한요소 시뮬레이션을 수행하였다. 두롤 교정후 잔류응력과 선경의 변화를 확인하기 위해 실험을 수행하였으며, 여기서 X 선 회절기를 이용하여 축방향 및 원주방향에서의 표면 잔류응력을 실험적으로 측정하였다.

Abstract: Cold drawn(CD) bars feature superb surface roughness, dimensional precision, and straightness. They are used in the manufacture of automotive parts and home electrical appliances. Two cross-roll straighteners have been used to manufacture CD bars for these industries. This study investigated the variation of the gap size between the two cross-rolls. It was found that changes in the gap size have a large influence on the residual stress and plastic deformation. Finite element method(FEM) simulations were performed to study the influence of the gap size on the residual stress in CD bars, and experiments were performed to verify the FEM results. The residual stresses were measured with X-ray diffraction in both the axial and the hoop directions.

- 기호설명 -

- G_{roll} : 교정기 두롤 사이의 간격, 롤 갭 [mm]
- D_{bar} : 봉강 선경[mm]
- D_{var} : 선경 변화량 [mm]
- S_{unit} : 단위 길이당 진직도 [mm/m]
- R : 감면율 [%], 인발전 면적에 대한 인발후 면적변화량의 비
- σ_{axial} : 축방향 표면잔류응력 [MPa]

- σ_{hoop} : 원주방향 표면잔류응력 [MPa]
- σ_{rad} : 반지름방향 표면잔류응력 [MPa]

1. 서론

마봉강은 열간압연 된 와이어 로드(wire rod)를 냉간에서 인발 후 일정길이로 절단하고 선형성을 부여한 제품이다. 열간인발 봉강에 비해 냉간인발 봉강은 표면조도, 치수 정밀도, 진직도에서 우수하여 자동차 부품 및 가전제품에 사용되고 있다. 특히 철강이나 비철소재의 선재 및 봉강을 생산하는 업체에서는 제품의 우수한 진직도를 얻기 위해 교정기를 사용한다.

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010.

11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, hychoster@dongbu.com

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

교정기에는 대표적으로 다단 벤딩 롤(multi bending roll) 방식, 회전 노즐(rotating nozzle) 방식, 두롤 교정(two-cross roll) 방식 등이 널리 사용되고 있다.⁽²⁾ 최근 조업현장에서는 성능이 가장 우수하다고 입증된 두롤 교정기를 이용한 교정방법이 널리 사용되고 있으며 이러한 방식에 의한 교정은 롤 형상, 롤 각도등의 압하조건이 중요하게 고려 되어야 한다. 실제 두롤 교정기를 사용하는 조업현장에서는 압하조건 중 롤 갭의 변화가 용이하며, 본 연구에서는 롤 갭에 의한 봉강의 소성변형 영향을 분석하였다. 롤 갭에 의한 두롤 교정시 다이 통과 후 발생한 잔류응력이 두롤 교정을 거치면서 변화하게 되며, 이로 인해 봉강의 선경 및 진직도도 바뀌게 된다. 그러므로 두롤 교정시 롤 갭이 봉강의 선경 변화와 잔류응력에 미치는 영향을 알아보는 것이 중요하고 이를 위해 롤 갭에 따른 선경 및 진직도를 측정하였다. 그리고 이때 생산된 봉강에 대해 X 선 회절을 이용하여 표면 잔류응력도 측정하였다. 이에 대한 결과를 조업현장에 실제적으로 적용하기 위해 실험실에서 분석 가능한 방법대신 잔류응력에 대한 대응특성으로 표면경도를 이용하였다. 그리고, 여기서 얻은 표면경도 측정값을 표면잔류응력과 비교, 분석하였다. 두롤 교정기의 롤 갭의 변화가 봉강의 잔류응력과 소성변형에 미치는 영향을 확인하기 위해 두롤 교정 전 공정인 인발공정에서 다이 통과 후 선경을 측정하였고 이때 봉강 내 잔류응력분포는 유한 요소 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. 두롤 갭에 따른 선경 및 진직도 영향

2.1 실험 방법

본 논문에서는 두롤 교정시, 롤 갭에 따른 선경 및 진직도의 영향을 알아보기 위해 Steel 1 강종과 Steel 2 강종을 선택하여 실험을 하였다. Fig. 1 은 두롤 교정기의 개략적인 모식도로 인발 다이를 통과한 봉강 소재가 압하력을 가하면서 회전하는 두롤 사이를 통과하게 되고 이때 봉강의 진직도는 교정이 일어나게 된다.

두롤 갭에 따른 선경 및 진직도의 영향을 알아보기 위해 다음과 같은 실험을 하였다.

Steel 1 강종의 경우 소재 직경은 $\Phi 14$ 이고 제품의 직경은 $\Phi 12.15$ (감면율 $R_{\%} = 24.7\%$)이며, 상부 롤의 각도는 17.59° , 하부 롤은 15.55° 로 하였다. 롤 갭은 12.19mm 를 기준으로 갭을 줄여 12.11mm ,

Table 1 Chemical compositions of steel 1 and steel 2

Kinds of steel	Chemical Composition(%)				
	C	Si	Mn	P	S
Steel 1	0.42-0.48	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030max	0.035max
Steel 2	0.13max	0.15-0.35	0.70-1.00	0.07-0.12	0.24-0.33

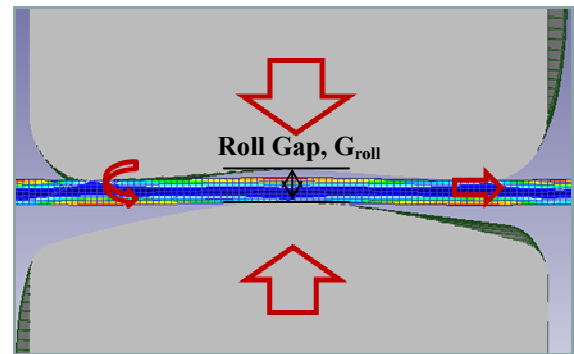


Fig. 1 The sketch of the 2 cross-roll straightener

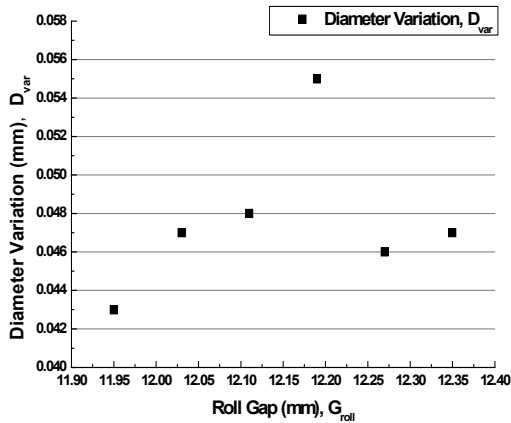
12.03mm , 11.95mm 로 그리고 갭을 늘려 12.27mm , 12.35mm 로 압하조건을 변경하여 실험을 하였다.

그리고 강종 Steel 2 강종의 경우 소재직경 $\Phi 11$, 제품 직경은 $\Phi 10$ (감면율 $R_{\%} = 17.4\%$)하였고 상부롤과 하부롤 각도는 각각 17.59° , 15.71° 로 하였으며 롤 갭은 9.4mm 을 기준으로 9.2mm 및 9.6mm 로 하여 실험을 수행하였다.

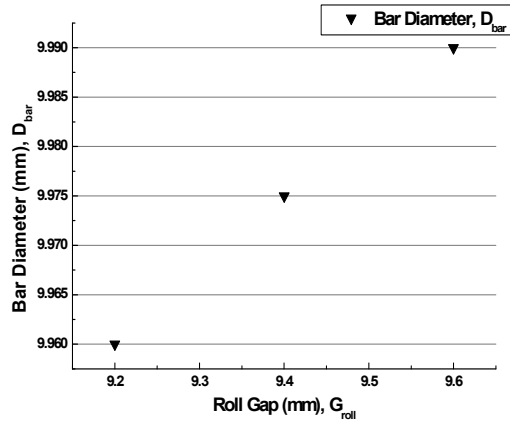
2.2 실험 결과

강종 Steel 1 의 롤 갭 변화에 따른 선경 및 진직도의 영향을 나타내는 그래프는 Fig. 2 와 같다.

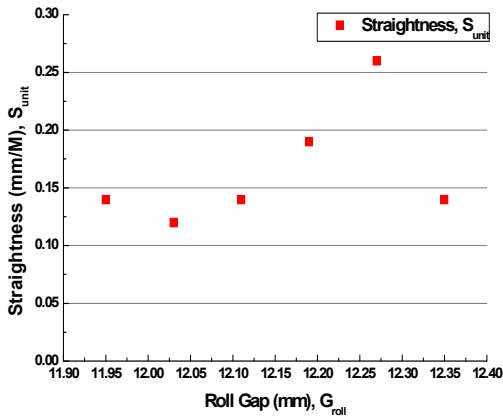
Fig. 2 에서 Steel 1 강종은 두롤 갭에 따른 봉강의 선경변화의 평균치가 최대 $12\mu\text{m}$ 의 차이가 발생함을 알 수 있었다. 기준 롤 갭(12.19mm) 대비 작은 경우와 큰 경우로 나누어 롤 갭의 선경변화를 살펴보고, 그 결과 기준 롤 갭에서 최대 선경변화를 보였으며, 그 때 진직도의 평균값도 기준 범위(0.3mm/m)내에 있음을 알 수 있었다. Steel 1 강종의 경우 두롤 교정시 최대 선경 변화량을 가지는 롤 갭이 존재함을 의미한다. 이러한 특징을 확인하기 위해 Steel 1 보다 탄소 함유량이 적인 Steel 2 강종에서도 실험을 하였다. 탄소 함유량의 차이로 Steel 2 는 Steel 1 에 비해 탄소성 복원량이 작아짐을 확인할 수 있었으며, Steel 2 강종의 롤 갭 변화에 따른 선경 및 진직도를 나타내는 그래



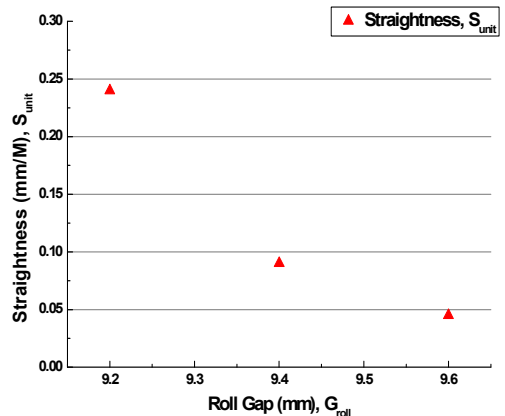
(a) Bar diameter variation according to roll gap



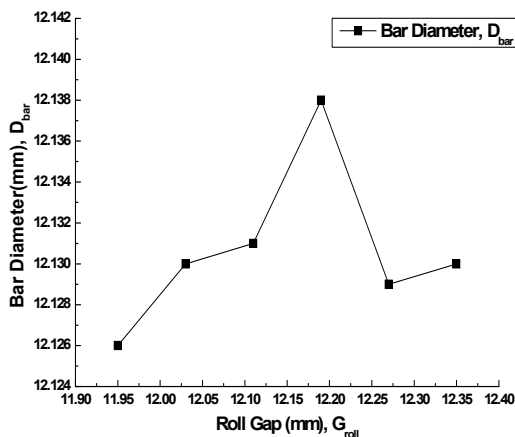
(a) Bar diameter after cross-roll straightening



(b) Bar straightness according to roll gap



(b) Bar straightness after cross-roll straightening



(c) The diameter change trend of a bar according to gap change in Steel 1

Fig. 2 The diameter and straightness change of a bar according to gap change in steel 1

프는 다음과 같다.

여기서 최대 선경변화를 가지는 롤 갭, 즉 변곡 점은 교정기의 롤 갭을 크게 함에 따라 봉강이 패스라인을 벗어나는 문제로 확인하지 못했다.

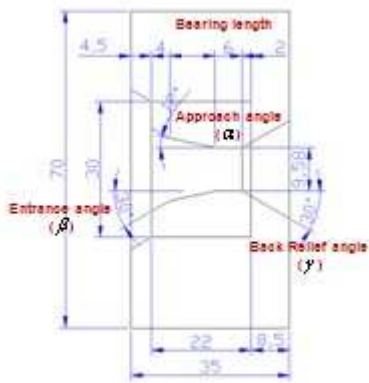
Fig. 3 The diameter and straightness change of a bar according to gap change after cross-roll straightening in steel 2

그러나, Steel 2의 경우에도 롤 갭에 따라 선경이 변화하며 Fig. 3에서 알 수 있듯이 최대 선경을 가지는 롤 갭에서 진직도가 가장 양호하다는 경향성을 확인할 수 있었다. 여기서 진직도가 양호하다는 것은 교정이 잘 되었다는 것을 의미하며 이때의 롤 갭에서 선경 변화도 가장 크게 된다.

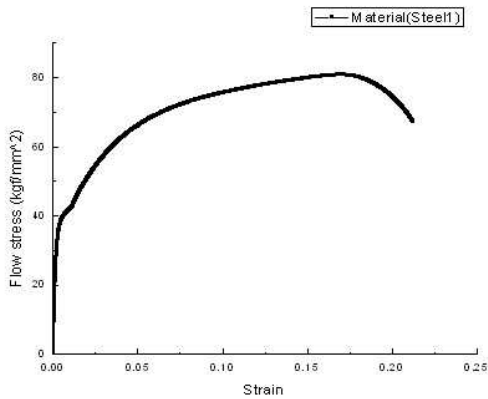
3. 인발 및 두를의 잔류응력과 선경영향

3.1 인발 후 잔류응력 분포 해석

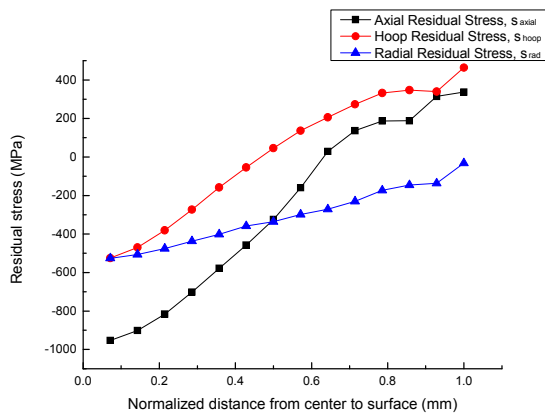
인발에 따른 잔류응력의 영향을 알아보기 위해 전산수치해석 프로그램인 DEFORM을 이용하였다. 인발 후 Steel 1 강종을 샘플링 하였으며, 이를 인장 실험한 데이터를 해석에 활용하였다. 이 때 탄성 계수 192.03GPa, 포아송비 0.3을 얻을 수 있었으며, 해석 조건으로 소재의 직경은 $\Phi 7.81$, 제품 직경은 $\Phi 7$ (감면율 약 20%), 다이의 내경은 $\Phi 6.985$ 로 하여



(a) Dies dimension



(b) Stress-strain curve of steel1

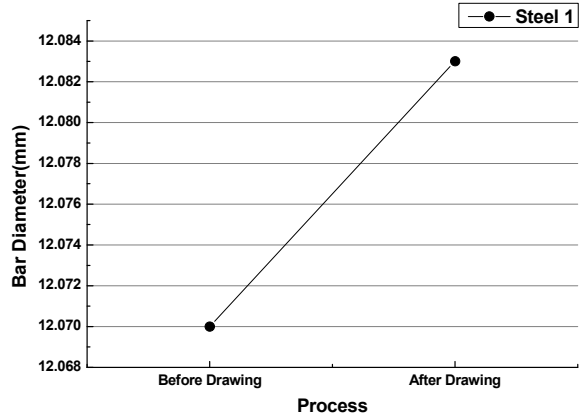


(c) Residual stresses calculated by Numerical simulations

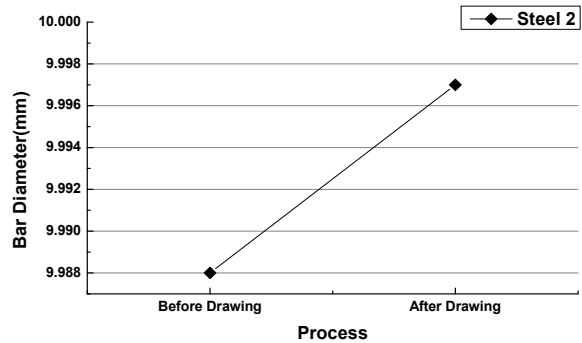
Fig. 4 Comparison between residual stresses calculated by numerical simulations after drawing

계산을 하였다. 다이의 형상 및 공정조건은 실제 조업조건과 유사하게 하여 인발 후 잔류응력 분포를 해석하였고 그 결과는 Fig. 4 와 같다.

Fig. 4 에서 알 수 있듯이 인발 다이 통과 후 축방향 및 원주방향에서는 표면에 인장잔류응력이



(a) Bar diameter change after drawing in Steel 2



(b) Bar diameter change after drawing in Steel 1

Fig. 5 The diameter change of a bar before drawing and after drawing

생기며 반지름방향에 비해 큰 잔류응력값을 가짐을 알 수 있다.^(1,4)

3.2 인발 다이 통과 후 선경의 영향

앞서 살펴본 Steel 1 와 Steel 2 의 강종에 대해 같은 강종의 소재를 가지고 인발 다이 통과 후 선경의 영향에 대해 살펴보았다. 인발 다이를 통과한 후 선경과 다이 내경을 비교하여 인발공정에서의 선경 변화량을 확인하였다.

인발 다이 통과 전, 후 선경을 비교하면 인발공정을 통해 선경이 증가했음을 알 수 있다. 이러한 증가의 원인은 인발 다이 통과시 탄소성복원에 의해서 일어나는 것으로 알려져 있다.⁽³⁾ 일반적으로 인발 다이 통과 시 봉강 소재는 표면부근에서 다이와의 마찰 등에 의해 과잉변형이 발생하며, 이로 인해 내부 및 표면에 잔류응력 분포가 바뀌게 되며 이때 선경에 영향을 미치게 된다. 이를 확인하기 위해 빛의 회절현상을 이용하는 X-선 잔류응력 측정기를 사용하여 봉강 표면의 잔류응력을

Table 2 Hardness, diameter and straightness comparison between processes according to roll gaps in steel 2

Process	Average Hardness (HRB)	Average Diameter (mm)	Straightness, S_{unit} (mm/m)
After drawing	86.46	9.988	
Roll gap 9.6	89.26	9.990	0.05
Roll gap 9.4	87.85	9.975	0.09
Roll gap 9.2	88.01	9.960	0.24

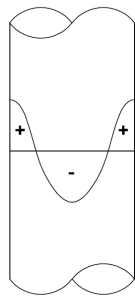


Fig. 6 Residual stress distribution after drawing process in axial direction

측정하였다. 인발 전, 후 선경 비교에 사용된 소재는 Steel 1 과 Steel 2 와 동일한 소재를 사용하였으며 실제 현장에서 실험을 수행하여 강종에 따른 경향성을 확인할 수 있었다.

3.3 두롤 교정 후 선경과 잔류응력의 변화

앞서 인발 후 잔류응력 분포 해석 및 논문을 통해 인발 후 축방향 잔류응력은 Fig. 6 과 같은 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 인발 다이 통과 후 표면에는 인장잔류응력이 생기며 이것이 두롤 교정을 거치면서 표면압축잔류응력으로 바뀌게 된다. 그리고 교정 정도에 따라 잔류응력의 크기가 바뀌게 되는데 이를 정성적으로 분석하기 위해 대응특성으로 표면 경도를 활용하였다.^(1,5)

Table 2 에서 인발 후보다 두롤 교정후 봉강의 경도가 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 인발 후 표면에 생긴 인장잔류응력과 두롤 교정후 표면에 생긴 압축잔류응력에 따른 영향으로 이러한 영향이 정도값에 반영 되어있음을 알 수 있다. 또한, 두롤 갭이 9.6 일 때 평균경도(HRB)값이 가장 큰 것을 알 수 있는데 이는 표면에 압축잔류응력이 다른 롤 갭에서 보다 큰 값을 가지기 때문인데, 그만큼 교정이 잘 되어서 진직도도 우수하고 선경 증가량도 커졌다고 판단 할 수 있다.

Table 3 Hardness, diameter and surface residual stress(by X-ray residual stress measurement in axial direction) comparison between processes according to roll gaps in steel 1

Process	Average Hardness (HRC)	Average Diameter (mm)	Axial Residual Stress, σ_{axial} (MPa)
After drawing	17.11	12.083	
Roll gap 12.19	20.11	12.138	-319.2
Roll gap 12.11	19.37	12.131	-280.7
Roll gap 12.27	19.55	12.129	-270.0

Table 3 에서 측정된 표면잔류응력은 일반 탄소강 및 비철금속의 비파괴적 표면잔류응력 측정에 이용되는 X-선 잔류응력 측정기(model : diffraktometer xStress 3000)를 사용하여 측정하였다. 여기서도 인발 후보다 두롤 교정후 봉강의 경도가 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한, 두롤 갭이 12.19mm 일 때 평균경도(HRC)값과 X-선 잔류응력 측정기로 측정한 표면 압축잔류응력이 가장 컸으며 이 때 선경이 가장 많이 증가 하였음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 선경 및 우수한 표면잔류응력을 가지는 즉, 교정이 잘 이루어지는 최적 롤 갭이 존재함을 확인할 수 있었다. 이러한 최적 롤 갭이 존재하는 이유는 봉강이 두 롤을 통과할 때 일반적으로 바우싱거 효과에 의해 교정이 이루어지게 되는데, 롤 갭이 최적값보다 클 경우는 두 롤이 봉강을 교정할 수 있는 충분한 압하력이 주지 못하기 때문에 정도 및 진직도가 다소 낮아지게 되고 충분한 표면 잔류응력도 생기지 않게 된다. 그리고 반대로 롤 갭이 최적값보다 작을 경우는 교정이 이루어지기 보다 소성 변형이 발생하므로 정도 및 진직도가 낮아지고, 표면 잔류응력도 최적값보다 낮아지게 된다. 앞서 언급했듯이 Table 2 의 Steel 2 는 롤 갭이 최적값에 도달했는지는 정확히 알 수 없다. 추가적으로 롤 갭을 더 크게하여 그 때의 정도 및 진직도, 잔류응력값을 비교하여 정확한 최적 롤 갭을 구하는 것이 필요하다. 이에 대해서는 향후에도 지속적인 연구가 필요할 것이다. 아울러 실제 생산현장에서 실험을 수행하여 전체적으로 비교 및 대조군이 명확하지 않아 향후 연구로 이에 대해 보완 해야 할 것 있다.

4. 결론

본 연구에서는 두롤 교정기의 제어인자인 롤 갭 변화를 통해 선경 및 진직도의 변화를 살펴보고, 이에 따른 잔류응력의 변화를 확인하였다. 잔류응

력을 측정하기 위해 X-선 잔류응력 측정기 및 FEM 시뮬레이션을 활용하였으며 잔류응력에 대한 대응특성으로서 경도값을 살펴보았다.

이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 롤 교정시 롤 갭에 따른 선경 및 진직도가 변화하며 최대 선경을 가지는 롤 갭이 존재함을 확인할 수 있었다.

(2) 인발 다이 통과 후 탄소성복원에 의한 선경 변화를 알 수 있었으며, 인발 및 두롤 후 잔류응력을 살펴보았다.

(3) 인발 다이 통과 후 봉강은 표면에 인장잔류응력을 가지게 되며, 이것이 두롤 교정 후 표면에 압축잔류응력으로 특성이 바뀐다. 이러한 잔류응력은 측정하기 쉬운 대응특성인 표면 경도측정을 통해서 정성적으로 분석할 수 있었다.

(4) 두롤 교정시 봉강 선경을 최대로 증가시키는 롤 갭에서 진직도 교정이 우수하였다. 최적 교정이 이루어질 때 봉강 표면에 압축잔류응력도 커짐을 알 수 있었으며 이는 대응특성인 표면 경도 측정을 통해서도 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Atienza, J. M., et al., 2005, "Residual Stresses in Cold Drawn Ferritic Rods," *Scripta Materialia*, Vol. 52, pp. 305~309
- (2) Kim, Y., Han, D. S. and Han, G. J., 2008, "The Influence on the Bar Straightness and Roll Strength for the Intersection Angle of a Two Cross-Roll Straightener," *Proceeding of the KSME Spring Annual Meeting*, pp. 216~219
- (3) Asakawa, M., 2000, "Effect of Rod Rolling Conditions on Bright Steel Bar Straightness," *JSTP*, Vol. 41, No. 468. Pp. 69~73
- (4) Lee, S.G., et al., 2005, "A Study on the influence of Process Parameters on Residual Stress and Reducing Residual Stress for Drawn Wire Using FE-Analysis," *KSPE*, pp. 834~837
- (5) Ko, D. C., Hwang, W. H., Lee, S. K. and Kim, B. M., 2006, "A Study on the Method of Residual Stress Relaxation During Wire Drawing and Evaluation of Residual Stress Using Nano Indentation Test," *KSPE*, Vol. 23, No. 5, pp. 162~169